

刘亚军, 胡启国, 王文静, 等. 生物有机肥以及钙镁硅型土壤调理剂对甘薯连作田土壤团聚体稳定性及有机碳含量的影响[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(1): 51-60.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.01.007

# 生物有机肥以及钙镁硅型土壤调理剂对甘薯连作田土壤团聚体稳定性及有机碳含量的影响

刘亚军<sup>1</sup>, 胡启国<sup>1</sup>, 王文静<sup>1</sup>, 吉存良<sup>2</sup>, 储凤丽<sup>1</sup>

(1. 商丘市农林科学院, 河南 商丘 476000; 2. 柘城县农业农村局, 河南 柘城 476200)

**摘要:** 为解决甘薯连作田土壤团聚体稳定性变差以及有机碳含量降低等问题, 通过田间定位试验, 以甘薯多年连作地为研究对象, 设置 5 个处理: 不施肥对照(CK1)、单施化肥对照(CK2)、单施生物有机肥处理(BF)、化肥+生物有机肥处理(CF)、化肥+土壤调理剂处理(CC), 研究不同施肥措施条件下土壤团聚体组成、稳定性以及团聚体有机碳含量的变化规律。结果表明, 与不施肥对照或单施化肥对照相比, 化肥+生物有机肥或化肥+土壤调理剂处理既提高了 >2.000 mm、0.251~2.000 mm 粒级团聚体含量和团聚体平均重量直径(*MWD*)、几何平均直径(*GMD*)、>0.250 mm 粒级大团聚体含量( $R_{>0.250}$ ), 又增加了全土以及各粒级团聚体总有机碳(TOC)和轻组有机碳(LOC)含量, 提升了 >2.000 mm、0.251~2.000 mm 粒级团聚体对 TOC、LOC 以及 HOC 的贡献率, 还提高了鲜薯产量。化肥+土壤调理剂处理 >2.000 mm、0.251~2.000 mm 粒级团聚体含量、*GMD*、 $R_{>0.250}$ 、各粒级团聚体 LOC 含量以及 >2.000 mm、0.251~2.000 mm 团聚体对 TOC、LOC、HOC 的贡献率最高; 单施生物有机肥处理 *MWD* 以及各粒级团聚体 TOC、HOC 含量均最高; 化肥+生物有机肥和化肥+土壤调理剂处理鲜薯产量最高。冗余分析显示, 甘薯连作田土壤 TOC、LOC 含量与土壤团聚体 *MWD*、*GMD* 及  $R_{>0.250}$  呈正相关关系, 与分形维数(*D*)呈负相关关系, 其中  $R_{>0.250}$  (56.15%) 为主要驱动因子。多年连续配施生物有机肥或土壤调理剂均有利于提升土壤团聚体稳定性, 提高土壤有机碳及其组分含量。在本试验条件下, 化肥配施土壤调理剂处理(CC)表现较好。

**关键词:** 甘薯; 连作; 生物有机肥; 钙镁硅型土壤调理剂; 土壤团聚体; 土壤有机碳

**中图分类号:** S531      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4440(2025)01-0051-10

## Effects of bio-organic fertilizer and calcium magnesium silicon soil conditioner on soil aggregate stability and organic carbon content in sweet potato continuous cropping field

LIU Yajun<sup>1</sup>, HU Qiguo<sup>1</sup>, WANG Wenjing<sup>1</sup>, JI Cunliang<sup>2</sup>, CHU Fengli<sup>1</sup>

(1. Shangqiu Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shangqiu 476000, China; 2. Agriculture and Rural Affairs Bureau of Zhecheng County, Zhecheng 476200, China)

收稿日期: 2024-01-22

基金项目: 现代农业产业技术体系“国家甘薯产业技术体系”项目(CARS-10)、中央引导地方(河南)科技发展资金资助项目(Z20231811128)

作者简介: 刘亚军(1990-), 男, 河南商丘人, 硕士, 助理研究员, 主要从事甘薯新品种选育及栽培研究。(E-mail) liuyajun0812@163.com

通讯作者: 吉存良, (E-mail) jicunliang0221@126.com

**Abstract:** In order to solve the problems of poor stability of soil aggregates and decrease of organic carbon content in sweet potato continuous cropping field, the field positioning test was carried out in sweet potato continuous cropping field for many years. Five treatments were set up, including no fertilizer (CK1), single application of chemical fertilizer (CK2), single application of bio-organic fertilizer (BF), chemical fertilizer + bio-organic fertilizer

(CF), chemical fertilizer + soil conditioner (CC). The changes of soil aggregate composition, stability and aggregate organic carbon content under different fertilization measures were studied. The results showed that compared with CK1 or CK2, CF treatment or CC treatment increased the content of  $>2.000$  mm and  $0.251-2.000$  mm aggregates, the mean weight diameter ( $MWD$ ), geometric mean diameter ( $GMD$ ), and the content of  $>0.250$  mm macroaggregates ( $R_{>0.250}$ ), and increased the total organic carbon (TOC) content and light fraction organic carbon (LOC) content of the whole soil and aggregates. Moreover, the contribution rate of  $>2.000$  mm and  $0.251-2.000$  mm aggregates to TOC, LOC and heavy fraction organic carbon (HOC) was increased, and the yield of fresh potato was also increased. Under CC treatment, the content of  $>2.000$  mm and  $0.251-2.000$  mm aggregates,  $GMD$ ,  $R_{>0.250}$ , LOC content of each aggregate and the contribution rate of  $>2.000$  mm and  $0.251-2.000$  mm aggregates to TOC, LOC and HOC were the highest. The contents of TOC and HOC in aggregates and  $MWD$  were the highest under BF treatment, and the yield of fresh potato was the highest under CF and CC treatments. Redundancy analysis showed that soil TOC content and LOC content were positively correlated with  $MWD$ ,  $GMD$  and  $R_{>0.250}$ , and negatively correlated with  $D$ .  $R_{>0.250}$  (56.15%) was the main driving factor. Continuous application of bio-organic fertilizer or soil conditioner for many years was conducive to improving the stability of soil aggregates and increasing the content of soil organic carbon and its components. Under the conditions of this experiment, the treatment of chemical fertilizer combined with soil conditioner (CC) performed better.

**Key words:** sweet potato; continuous cropping; bio-organic fertilizer; calcium magnesium silicon type soil conditioner; soil aggregate; soil organic carbon

甘薯是河南省重要粮食作物之一,近年来随着甘薯产业转型升级以及多元化发展,其需求量逐年递增,且因常年连作种植,引起的甘薯产量和质量下降、病虫害频发等连作障碍问题也愈发突出<sup>[1-2]</sup>。而广大种植户为消减甘薯连作障碍带来的负面影响,往往采用增施化肥、农药等措施,这些措施既造成了土壤养分失衡、生物学活性降低,还增加了农田土壤药剂残留风险,更严重影响了甘薯种植效益以及土地可持续利用能力<sup>[3-4]</sup>。因此,改变施肥习惯成为目前甘薯连作种植急需解决的首要问题。研究结果表明,有机无机肥配施是缓解作物连作及提高土壤活性的有效方法<sup>[5-7]</sup>。杨凯等<sup>[8]</sup>研究发现,化肥与有机物料配施能够提升大粒径团聚体有机碳含量以及团聚体稳定性,且土壤可溶性有机碳与土壤大粒径团聚体含量、团聚体稳定性呈显著正相关关系;周郑雄等<sup>[9]</sup>研究结果表明,与单施无机复合肥相比,化肥配施复合微生物菌肥能够明显提升土壤团聚体稳定性,土壤酶活性提高;Wu 等<sup>[10]</sup>研究结果表明,与单施化肥相比,无机有机肥配施有利于改善土壤特性,提高土壤生态环境稳定性,降低植株发病率。由此可见,无机有机肥合理配施能够在一定程度上缓解作物连作障碍带来的负面影响。

生物有机肥具有长效、调理土壤微生物活性以及改良土壤物理结构等作用<sup>[11]</sup>。钙镁硅型调理剂具有较大的比表面积以及良好的吸附性,施入土壤

中能够改善土壤结构,提升土壤质量<sup>[12-13]</sup>。有研究表明,配施生物有机肥有利于改善土壤微生态环境,提高土壤生物学活性,增加土壤有机质含量,促进根系吸收养分,提高甘薯产量及品质<sup>[14-15]</sup>;贾璇等<sup>[16]</sup>研究结果表明,长期施用土壤调理剂能够改善土壤团聚体及有机质分布,有利于土壤团聚体中有机质的赋存转化,提升土壤团聚体稳定性以及抗侵蚀能力;靳辉勇等<sup>[17]</sup>研究结果表明,施用土壤调理剂能够改善土壤微生态环境,提高作物根系活力。可见,生物有机肥与土壤调理剂在改善土壤结构,提高土壤肥力方面均具有一定的可行性。

土壤有机碳是土壤中养分循环与供应的核心物质,能够敏感地反映农田土壤碳库动态变化,对维持土壤碳库平衡以及调控土壤生态环境具有重要的作用,其储量与稳定性的提高有利于提高农田土壤结构稳定性,进而提升土壤肥力以及生产力,是评价土壤质量的重要指标<sup>[18-19]</sup>。土壤团聚体是土壤结构的基本单元,是由土壤中不同粒径土壤颗粒与有机无机化合物胶结而成,是土壤中能量流通、物质循环以及有机碳固存的重要场所,其组成变化能够直接地影响土壤物理结构以及养分供应能力<sup>[20]</sup>。施肥是改变农田土壤有机碳组分转化与固存的主要原因,也是影响土壤团聚体组成与稳定性的主要驱动力之一<sup>[21-22]</sup>。有研究表明,连作会影响土壤团聚体及有机碳分布与转化,而合理施肥措施能够促

进连作土壤大粒径团聚体形成,提升团聚体稳定性以及团聚体有机碳含量<sup>[23-25]</sup>。因此,探究土壤团聚体组成分布及有机碳组分变化对连作土壤不同施肥措施的响应,对评价土壤质量与肥力演变具有重要意义。

目前,生物有机肥与土壤调理剂主要应用在设施蔬菜种植方面,关于甘薯种植方面的研究并不多,而通过配施生物有机肥与钙镁硅型调理剂来改良甘薯连作田土壤物理结构以及增加土壤有机碳方面的研究更是鲜有报道<sup>[26-28]</sup>。因此,本试验通过施用生物有机肥、化肥与生物有机肥配施、化肥与钙镁硅型调理剂配施,研究土壤团聚体以及有机碳组分变化,探讨缓解甘薯连作障碍方面的可行性,以期对甘薯连作田的合理配施提供理论依据与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于 2020–2023 年在河南省商丘市双八镇朱庄村(116°38'E,39°93'N)进行。该地位于河南省东部,四季分明,冬冷夏热,属典型暖温带大陆季风型气候。试验区常年平均降雨量 680~760 mm,全年平均气温 14.2~14.6℃,全年平均日照时长 2 200~2 400 h,全年无霜期 207~214 d。供试土壤为黄潮土壤土,0~20 cm 土层的土壤理化特性为:土壤容重 1.43 g/cm<sup>3</sup>、孔隙度 48.98%、有机质含量 15.49 g/kg、碱解氮含量 47.08 mg/kg、速效磷含量 55.87 mg/kg、速效钾含量 146.62 mg/kg、土壤 pH 值 8.02。试验地种植制度为夏季甘薯、冬季小麦,试验区地力均匀,排灌便利。

1.2 供试材料

供试甘薯品种:商薯 21(商丘市农林科学院甘薯研究所提供);供试小麦品种:商麦 167(商丘市农林科学院小麦区试站提供);供试化肥:复合肥(N 含量:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量:K<sub>2</sub>O 含量=10:10:20,购自河南心连心化工集团有限公司);供试生物有机肥:N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量分别为 2.82%、1.80%、0.95%,有机质含量≥40%,有效活菌数≥5×10<sup>7</sup> CFU/g,购自河北中创丰农生物技术有效公司;供试土壤调理剂:钙镁硅型调理剂,Ca≥23.0%、Mg≥4.0%、Si≥14.0%,有效活菌数≥5×10<sup>7</sup> CFU/g,购自山东农大肥业科技股份有限公司。

1.3 试验设计

试验采用随机区组设计,设置 5 个处理,分别为不施肥对照(CK1)、单施化肥对照(CK2)、单施生物有机肥(BF)、化肥+生物有机肥(CF)、化肥+土壤调理剂(CC),每个处理 3 次重复,共计 15 个试验小区。每个小区 8 m×10 m,甘薯行株距为 0.80 m×0.25 m,小区间隔为 0.60 m,周围保护行为 3.00 m。试验设计采用等量施氮的原则,各处理施肥量如表 1 所示。不同肥料与调理剂均作为基肥在起垄前施入土壤中,生育期内不追肥。小麦、甘薯秸秆均全量粉碎还田。小麦季种植均按照当地农民习惯进行,不进行特殊处理。甘薯生育期为 6 月 15 日–10 月 15 日,小麦生育期为 10 月 25 日–6 月 5 日。

表 1 试验设计

Table 1 Experimental design

处理	化肥 (kg/hm <sup>2</sup> )	生物有机肥 (kg/hm <sup>2</sup> )	土壤调理剂 (kg/hm <sup>2</sup> )
CK1	—	—	—
CK2	750	—	—
BF	—	2 659.60	—
CF	525	797.90	—
CC	750	—	600

1.4 样品采集与测定方法

1.4.1 样品采集 于 2023 年甘薯收获前 7 d(10 月 9 日)利用直径 38 mm 土钻通过 5 点取样法采取 0~20 cm 土壤样品。团聚体土壤样品装在塑料盒内运回实验室,一部分土样沿其自然裂隙轻轻剥开,尽量避免土壤样品因外力而发生形变,晾干后用于团聚体各项指标测定,过筛后的土样用于团聚体有机碳组分含量的测定,另一部分土壤样品磨碎摊开后自然阴干,用于全土有机碳组分含量的测定。

1.4.2 测定方法 土壤团聚体组成测定采用干筛法<sup>[29]</sup>。称取 100 g 风干土样,放入由上到下依次为 2.000 mm、0.250 mm、0.053 mm 的振荡套筛中,用振荡筛分仪在每 1 min 180 次频率下振荡 1~2 min,然后称取过筛后各粒级团聚体重量,用于土壤团聚体组成与稳定性计算。

土壤总有机碳(TOC)含量测定采用 K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>容量-外加热法<sup>[30]</sup>。轻组有机碳(LOC)含量、重组有机碳(HOC)含量测定均采用溴化锌密度分组法<sup>[31]</sup>。

### 1.5 数据处理

用几何平均直径 ( $GMD$ )、平均重量直径 ( $MWD$ )、分形维数 ( $D$ ) 以及  $>0.250$  mm 粒级大团聚体含量 ( $R_{>0.250}$ ) 来表征土壤团聚体特性, 计算公式如下<sup>[29]</sup>。

$$GMD = \exp \left[ \frac{\sum_{i=1}^n M_i \times \ln \bar{X}_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \right]$$

$$MWD = \sum_{i=1}^n (\bar{X}_i \times W_i)$$

$$D = 3 - \frac{\lg \left[ \frac{W_{\delta < \bar{X}_i}}{W_t} \right]}{\lg \left( \frac{\bar{X}_i}{X_{\max}} \right)}$$

$$R_{>0.250} = \frac{M_{>0.250}}{M_t} \times 100\%$$

$$R_c = \frac{AC_i \times W_i}{TC} \times 100\%$$

式中:  $M_i$  为第  $i$  粒级土壤团聚体的重量 (g),  $\bar{X}_i$  为第  $i$  粒级土壤团聚体的平均直径 (mm),  $W_i$  为第  $i$  粒级土壤团聚体占总团聚体的比例 (%),  $W_t$  为土壤总重量 (g),  $X_{\max}$  为最大直径团聚体的平均直径 (mm),  $W_{\delta < \bar{X}_i}$  为粒径小于  $\bar{X}_i$  的土壤团聚体重量 (g),  $R_{>0.250}$  为  $>0.250$  mm 粒级团聚体所占比例 (%),  $M_t$  为土壤团聚体总重量 (g),  $R_c$  为土壤团聚体有机碳的相对贡献率 (%),  $AC_i$  为第  $i$  粒级团聚体有机碳含量 (g),  $TC$  为土壤有机碳总量 (g)。

### 1.6 数据处理

采用 Excel 2018 进行数据计算与作图, 采用 SPSS 19.0 进行处理间方差分析, 采用 Canoco 5.0 进行冗余 (RDA) 分析与作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 生物有机肥以及钙镁硅型土壤调理剂对土壤团聚体组成的影响

由表 2 可知, 不同处理中  $0.251 \sim 2.000$  mm 粒级团聚体占比最多, 其次是  $>2.000$  mm 粒级团聚体,  $0.053 \sim 0.250$  mm、 $<0.053$  mm 粒级团聚体占比较小。与 CK1 处理相比, 不同施肥处理均显著提高了土壤中  $>2.000$  mm、 $0.251 \sim 2.000$  mm 粒级团聚体占比, 且显著降低了  $0.053 \sim 0.250$  mm、 $<0.053$  mm 粒级团聚体占比。在不同施肥处理中, CC 处理的  $>2.000$  mm、

$0.251 \sim 2.000$  mm 粒级团聚体占比最多, CC 处理的  $0.053 \sim 0.250$  mm 粒级团聚体以及 BF 处理  $<0.053$  mm 粒级团聚体占比最小。与 CK2 处理相比, BF、CF、CC 处理的  $>2.000$  mm 粒级团聚体占比分别显著提高 14.03%、7.34%、15.64% ( $P < 0.05$ ), CC 处理的  $0.251 \sim 2.000$  mm 粒级团聚体占比显著提高 7.95% ( $P < 0.05$ ), BF、CF、CC 处理的  $0.053 \sim 0.250$  mm 与  $<0.053$  mm 粒级团聚体占比分别显著降低了 12.12%、9.70%、33.16% 与 29.17%、13.54%、18.14% ( $P < 0.05$ )。

表 2 不同施肥处理对土壤团聚体分布的影响

Table 2 Effects of different fertilization treatments on the distribution of soil aggregates

处理	各粒级团聚体含量 (%)			
	$>2.000$ mm	$0.251 \sim 2.000$ mm	$0.053 \sim 0.250$ mm	$<0.053$ mm
CK1	24.39±1.62d	42.28±2.87c	18.58±0.86a	14.75±0.89a
CK2	26.15±1.81c	45.41±3.12b	16.92±1.58b	11.52±1.26b
BF	29.82±2.02a	47.15±3.08ab	14.87±1.96c	8.16±0.93d
CF	28.07±0.95b	46.69±2.65ab	15.28±0.97c	9.96±0.56c
CC	30.24±1.44a	49.02±3.51a	11.31±1.40d	9.43±0.74c

CK1: 不施肥对照; CK2: 单施化肥对照; BF: 单施生物有机肥处理; CF: 化肥+生物有机肥处理; CC: 化肥+土壤调理剂处理。同列数据中不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

### 2.2 生物有机肥以及钙镁硅型土壤调理剂对土壤团聚体稳定性的影响

由表 3 可知, 与 CK1 相比, BF、CF、CC 处理能够提高土壤团聚体的平均重量直径 ( $MWD$ )、几何平均直径 ( $GMD$ )、 $>0.250$  mm 团聚体含量 ( $R_{>0.250}$ )。而不同施肥处理中, BF 处理的团聚体  $MWD$  最大, 较 CK2 显著提高 5.43% ( $P < 0.05$ ), 与 CF、CC 处理相比均无显著差异。CC 处理的团聚体  $GMD$  最大, 较 CK2 处理显著提高 7.34% ( $P < 0.05$ ), 与 BF、CF 处理相比均无显著差异; CC 处理的团聚体  $R_{>0.250}$  最大, 较 CK2、CF 处理分别显著提高 10.76%、6.02% ( $P < 0.05$ ), 与 BF 处理相比无显著差异。BF、CF、CC 处理团聚体分形维数较 CK2 分别降低 1.26%、0.42%、2.10%, 但差异均不显著。

### 2.3 生物有机肥以及钙镁硅型土壤调理剂对土壤有机碳的影响

2.3.1 土壤团聚体总有机碳含量 由图 1 所示, 与 CK1 相比, 不同施肥处理均能够提高全土以及各粒级团聚体总有机碳 (TOC) 含量。而不同施肥处理



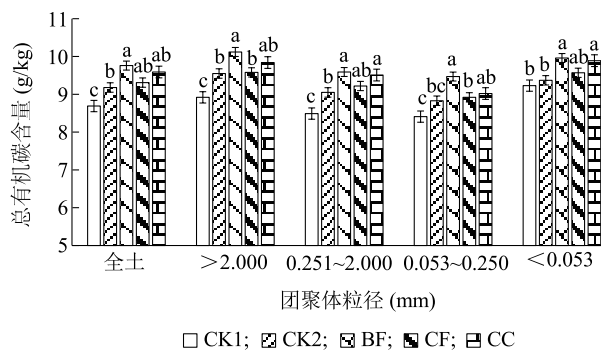
中, BF 处理全土以及 >2.000 mm、0.251~2.000 mm、0.053~0.250 mm、<0.053 mm 粒级团聚体的 TOC 含量均最高;与其他处理相比, BF 处理全土以及 >2.000 mm、0.251~2.000 mm、0.053~0.250 mm 和 <0.053 mm 粒级团聚体 TOC 含量分别提高了 1.77%~12.31%、2.85%~13.45%、0.84%~12.96%、4.99%~12.60%、0.71%~7.91%。其中, BF 处理中各粒级团聚体 TOC 含量均显著高于 CK2。CC 处理的全土以及 >2.000 mm、0.251~2.000 mm、0.053~0.250 mm、<0.053 mm 粒级团聚体 TOC 含量均次之,与 BF 处理相比均差异不显著。

表 3 不同施肥处理土壤团聚体的稳定性

Table 3 Stability of soil aggregates under different fertilization treatments

处理	平均重量直径 (MWD) (mm)	几何平均直径 (GMD) (mm)	>0.250 mm 团聚体含量 ( $R_{>0.250}$ ) (%)	分形维数 (D)
CK1	1.26±0.08c	1.05±0.06c	66.67±4.92d	2.41±0.16a
CK2	1.29±0.06bc	1.09±0.08bc	71.56±6.29c	2.38±0.12a
BF	1.36±0.08a	1.14±0.09ab	76.97±5.85ab	2.35±0.15a
CF	1.32±0.09abc	1.12±0.08ab	74.76±6.19bc	2.37±0.06a
CC	1.34±0.11ab	1.17±0.10a	79.26±7.58a	2.33±0.10a

CK1:不施肥对照;CK2:单施化肥对照;BF:单施生物有机肥处理;CF:化肥+生物有机肥处理;CC:化肥+土壤调理剂处理。同列数据中不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。



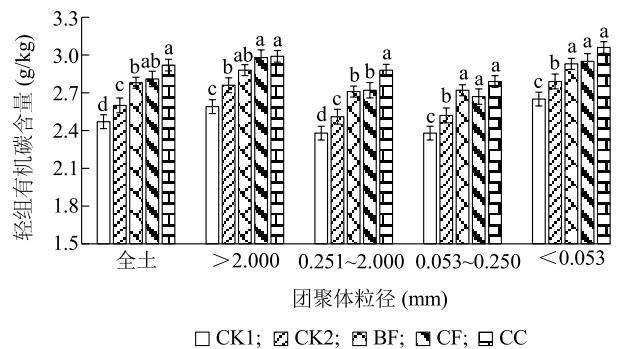
CK1:不施肥对照;CK2:单施化肥对照;BF:单施生物有机肥处理;CF:化肥+生物有机肥处理;CC:化肥+土壤调理剂处理。图柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。

图 1 不同施肥处理土壤团聚体总有机碳含量

Fig.1 Total organic carbon content of soil aggregates under different fertilization treatments

2.3.2 生物有机肥以及钙镁硅型土壤调理剂对土壤团聚体轻组有机碳的影响 如图 2 所示,与 CK1 相比,不同施肥处理均能显著提高全土以

及 >2.000 mm、0.251~2.000 mm、0.053~0.250 mm 和 <0.053 mm 粒级团聚体轻组有机碳(LOC)含量。而不同施肥处理中 CC 处理全土以及 >2.000 mm、0.251~2.000 mm、0.053~0.250 mm、<0.053 mm 粒级团聚体 LOC 含量均最高,与其他处理相比,CC 处理全土以及 >2.000 mm、0.251~2.000 mm、0.053~0.250 mm 和 <0.053 mm 粒级团聚体 LOC 含量分别提高了 3.91%~18.22%、0.34%~15.44%、5.88%~21.01%、2.57%~17.23%、3.73%~15.47%。其中,CC 处理中各粒级团聚体 LOC 含量均显著高于 CK2。CF 处理全土以及 >2.000 mm、0.053~0.250 mm、<0.053 mm 粒级团聚体和 BF 处理 0.053~0.250 mm 粒级团聚体 LOC 含量次之,均显著高于 CK1、CK2。



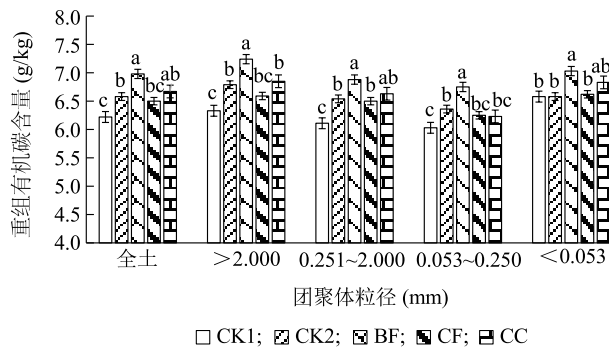
CK1:不施肥对照;CK2:单施化肥对照;BF:单施生物有机肥处理;CF:化肥+生物有机肥处理;CC:化肥+土壤调理剂处理。图柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。

图 2 不同施肥处理土壤团聚体轻组有机碳含量

Fig.2 Light fraction organic carbon content of soil aggregates under different fertilization treatments

2.3.3 生物有机肥以及钙镁硅型土壤调理剂对土壤团聚体重组有机碳的影响 如图 3 所示。与 CK1 相比,不同施肥处理全土以及各粒级团聚体重组有机碳(HOC)含量均有所提高。不同施肥处理中,BF 处理全土以及 >2.000 mm、0.251~2.000 mm、0.053~0.250 mm、<0.053 mm 粒级团聚体 HOC 含量均最高;与其他处理相比,BF 处理全土以及 >2.000 mm、0.251~2.000 mm、0.053~0.250 mm 和 <0.053 mm 粒级团聚体 HOC 含量分别提高了 4.65%~12.22%、5.69%~14.38%、3.77%~12.60%、6.13%~11.94%、2.93%~6.84%。其中,CC 处理中各粒级团聚体 HOC 含量均显著高于 CK1。CC 处理全土以及 >2.000 mm、0.251~2.000 mm、<0.053 mm

粒级团聚体 HOC 含量次之,与 CK2 处理相比均无显著差异。CK2 0.053~0.250 mm 粒级团聚体 HOC 含量次之,与 CF、CC 处理相比也均无显著差异。



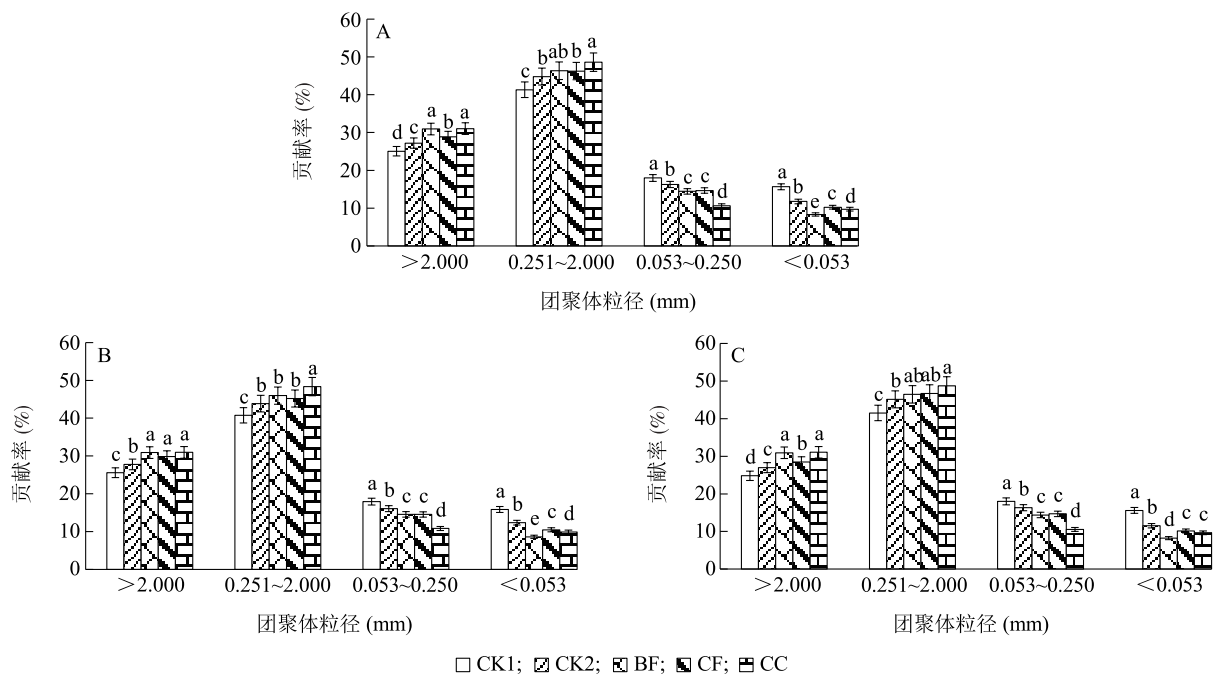
CK1:不施肥对照;CK2:单施化肥对照;BF:单施生物有机肥处理;CF:化肥+生物有机肥处理;CC:化肥+土壤调理剂处理。图柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图3 不同施肥处理土壤团聚体重组有机碳含量

Fig.3 The heavy fraction organic carbon content of soil aggregates under different fertilization treatments

## 2.4 生物有机肥以及钙镁硅型土壤调理剂对土壤团聚体有机碳贡献率的影响

如图 4 所示,0.251~2.000 mm 粒级团聚体对 TOC、LOC 以及 HOC 的贡献率最高,可达40.74%~48.73%;其次为 >2.000 mm 粒级团聚体,达到24.82%~31.06%;<0.053 mm 粒级团聚体贡献率最低,仅为8.22%~15.82%。与 CK1、CK2 相比,BF、CF、CC 处理均可提高>2.000 mm、0.251~2.000 mm 粒级团聚体对 TOC、LOC 以及 HOC 的贡献率,降低0.053~0.250 mm、<0.053 mm 粒级团聚体对 TOC、LOC 以及 HOC 的贡献率。其中,CC 处理的>2.000 mm、0.251~2.000 mm 粒级团聚体对 TOC、LOC 以及 HOC 的贡献率均最高,较 CK2 分别显著提高 14.08%、11.53%、15.12%与 8.58%、10.29%、7.98%。BF、CF、CC 处理的0.053~0.250 mm、<0.053 mm 粒级团聚体对 TOC、LOC 以及 HOC 的贡献率较 CK2 均显著降低 ( $P < 0.05$ )。其中,CC 处理的0.053~0.250 mm 粒级团聚体以及 BF 处理的<0.053 mm 粒级团聚体对 TOC、LOC 以及 HOC 的贡献率最低 ( $P < 0.05$ )。



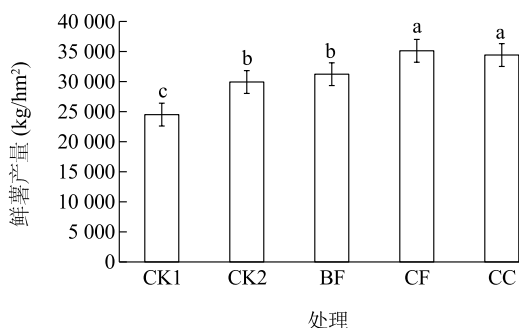
A: 土壤总有机碳(TOC)含量的贡献率;B:轻组有机碳(LOC)含量的贡献率;C:重组有机碳(HOC)含量的贡献率。CK1:不施肥对照;CK2:单施化肥对照;BF:单施生物有机肥处理;CF:化肥+生物有机肥处理;CC:化肥+土壤调理剂处理。图柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图4 不同施肥处理不同粒级团聚体对土壤总有机碳(A)、轻组有机碳(B)、重组有机碳(C)含量的贡献率

Fig.4 The contribution rates of different size aggregates to soil total organic carbon (A), light fraction organic carbon content (B) and heavy fraction organic carbon (C) under different fertilization treatments

## 2.5 生物有机肥以及钙镁硅型土壤调理剂对鲜薯产量的影响

如图5所示,与CK1相比,不同施肥处理均可显著提高鲜薯产量。与CK2相比,化肥配施生物有机肥、土壤调理剂处理均能够不同程度地提高鲜薯产量,CF、CC处理的鲜薯产量分别较CK2显著提高17.35%、15.01% ( $P < 0.05$ )。其中,CF处理的鲜薯产量最高。



CK1:不施肥对照;CK2:单施化肥对照;BF:单施生物有机肥处理;CF:化肥+生物有机肥处理;CC:化肥+土壤调理剂处理。图柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图5 不同施肥处理鲜薯产量

Fig.5 Fresh potato yields under different fertilization treatments

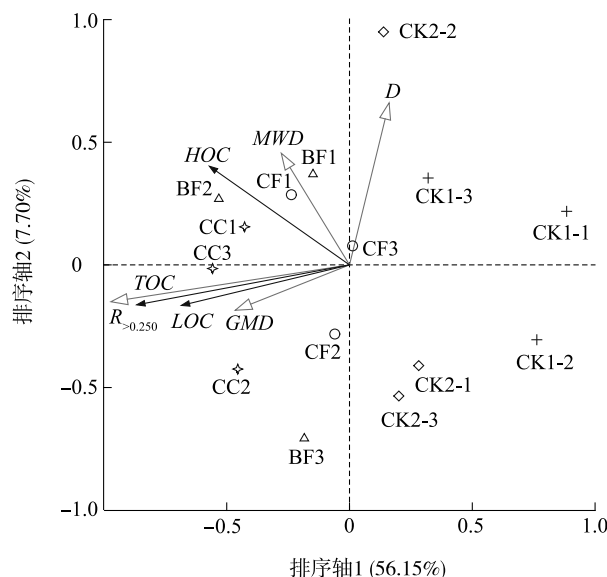
## 2.6 土壤有机碳组分与土壤团聚体稳定性的多元分析

通过对土壤有机碳组分与土壤团聚体稳定性的冗余分析(图6),排序轴1和排序轴2能够在累积变量63.85%水平上解释不同施肥措施条件下土壤团聚体稳定性对土壤有机碳组分的影响。图中各处理点较为分散,说明不同施肥措施对土壤有机碳组分变化产生不同的影响。土壤TOC、LOC含量与土壤团聚体MWD、GMD及 $R_{>0.250}$ 呈正相关关系,与D呈负相关关系,HOC含量与土壤团聚体MWD、GMD及 $R_{>0.250}$ 、D均呈正相关关系,但相关性明显弱于土壤TOC、LOC含量。假设性测验结果表明,基于土壤碳组分与土壤团聚体稳定性排序轴的相关性较好。其中, $R_{>0.250}$  (56.15%)为主要驱动因子。说明不同施肥措施在促进大粒级团聚体形成时,同样会促进有机碳组分的分解与转化,进而提高土壤有机碳及其组分含量。

## 3 讨论

### 3.1 生物有机肥以及钙镁硅型调理剂对土壤团聚体组成与稳定性变化的影响

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,其组成与



图中TOC、LOC、HOC分别表示土壤总有机碳含量、轻组有机碳含量、重组有机碳含量;MWD、GMD、D及 $R_{>0.250}$ 分别表示土壤团聚体平均重量直径、几何平均直径、分形维数以及 $>0.250$  mm粒级团聚体含量;CK1-1、CK1-2、CK1-3表示不施肥对照的3个重复;CK2-1、CK2-2、CK2-3表示单施化肥对照的3个重复;BF1、BF2、BF3表示单施生物有机肥处理的3个重复;CF1、CF2、CF3表示化肥+生物有机肥处理的3个重复;CC1、CC2、CC3表示化肥+土壤调理剂处理的3个重复。

图6 不同施肥处理土壤有机碳组分与团聚体稳定性的冗余分析(RDA)

Fig.6 Redundancy analysis (RDA) of soil organic carbon fractions and aggregate stability under different fertilization treatments

稳定性是评价土壤结构的重要指标,而良好的土壤结构是农田高效生产的基础<sup>[32]</sup>。研究表明,生物有机肥中含有丰富的有机质与腐殖酸,有利于促进微小团聚体胶结,且丰富的碳源物质可供土壤微生物分解与利用,并提高土壤微生物代谢功能以及土壤生物活性,进一步促进大粒径团聚体形成<sup>[33-34]</sup>。本研究结果表明,与不施肥对照或单施化肥对照相比,生物有机肥或土壤调理剂能够提高土壤 $>2.000$  mm和 $0.251 \sim 2.000$  mm粒级团聚体含量,降低 $0.053 \sim 0.250$  mm、 $<0.053$  mm粒级团聚体含量,即施用生物有机肥或钙镁硅型土壤调理剂可以促进微小粒径团聚体向大粒径团聚体转化,有利于增加土壤结构稳定性。这与李敏等人的研究结果较为一致<sup>[6]</sup>。

土壤大粒径团聚体所占比例( $R_{>0.250}$ )含量以

及  $MWD$ 、 $GMD$ 、 $D$  是评价土壤团聚体稳定性重要指标,其中, $R_{>0.250}$ 、 $MWD$ 、 $GMD$  越大, $D$  越小,表明土壤团聚体聚化程度越高,抗扰动能力越强,土壤结构越稳定<sup>[35-36]</sup>。本研究中,与不施肥对照或单施化肥对照相比,生物有机肥或土壤调理剂能够提高土壤团聚体  $R_{>0.250}$ 、 $MWD$ 、 $GMD$ ,降低  $D$ ,这与大多数学者的研究结果较为一致<sup>[37-38]</sup>。其中,生物有机肥处理与土壤调理剂处理土壤团聚体组成及稳定性有差异,原因推测:一是可能跟生物有机肥与土壤调理剂在改善土壤耕层理化性质方面的能力差异有关;二是可能跟生物有机肥及土壤调理剂与土壤之间的生化反应方向及强度不同有关,从而使得土壤团聚体组成与稳定性表现出差异。由此可知,施用生物有机肥或土壤调理剂有利于促进大粒径团聚体形成,能够提高土壤团聚体稳定性,改善耕层土壤结构。

### 3.2 生物有机肥与钙镁硅型调理剂对土壤有机碳组分含量变化的影响

土壤团聚体结构稳定对土壤有机碳固存起重要保护作用<sup>[4]</sup>。土壤有机碳在提高土壤质量、缓解土壤退化方面具有重要作用,其含量变化易受自然因素、人为因素等影响<sup>[35]</sup>。有关研究结果表明,长期添加外源有机物能够增加土壤的固碳供碳能力<sup>[29]</sup>。本研究中,与不施肥对照或单施化肥对照相比,化肥+生物有机肥、化肥+土壤调理剂能够提高全土以及  $>2.000\text{ mm}$ 、 $0.251\sim 2.000\text{ mm}$ 、 $0.053\sim 0.250\text{ mm}$ 、 $<0.053\text{ mm}$  粒级团聚体  $TOC$ 、 $LOC$  含量,提升  $>2.000\text{ mm}$  和  $0.251\sim 2.000\text{ mm}$  粒级团聚体  $TOC$ 、 $LOC$ 、 $HOC$  贡献率。其中,单施生物有机肥处理土壤  $TOC$ 、 $HOC$  含量明显高于其他施肥处理,CF 处理  $LOC$  含量以及  $>2.000\text{ mm}$ 、 $0.251\sim 2.000\text{ mm}$  团聚体对  $TOC$ 、 $HOC$  以及  $LOC$  贡献率最高。分析认为,与化肥+生物有机肥、化肥+土壤调理剂处理相比,单施生物有机肥能够增加土壤有机质以及团聚体胶结物质含量,对促进大粒径团聚体形成以及有机碳固存具有明显的促进作用,但对土壤理化性质以及土壤结构的改良作用可能不及化肥+生物有机肥或化肥+土壤调理剂处理。而土壤调理剂能够为土壤微生物代谢活动提供良好的生存环境,促进一些功能菌分泌胞外多糖物质,有利于大粒径团聚体形成,进而提高土壤有机碳及其组分固化速率,提升土壤大粒径

团聚体  $TOC$ 、 $HOC$  以及  $LOC$  贡献率<sup>[39-40]</sup>。曹晶晶<sup>[41]</sup>研究发现,土壤轻组有机碳主要集中在大粒径团聚体中,而重组有机碳多集中在微团聚体中,长期添加有机物料有利于促进土壤大粒径团聚体形成,从而提高轻组活性有机碳含量。廖敏等<sup>[42]</sup>研究发现,有机肥的施入能够增加重组有机碳含量及其在总有机碳中的占比。造成上述差异的原因可能是与土壤、气候、降雨量等自然因素有关,也可能是耕作、施肥方式以及土壤肥力水平的差异,从而影响了团聚体的组成以及有机碳组分含量。

土壤有机碳组分转化与团聚体结构及稳定性密切相关<sup>[43]</sup>。本试验中,不同施肥措施条件下土壤有机碳组分与土壤团聚体稳定性的排序轴相关性较好,说明土壤有机碳组分变化受土壤团聚体组成影响较大。其中,土壤  $TOC$ 、 $LOC$  含量与土壤团聚体  $MWD$ 、 $GMD$  及  $R_{>0.250}$  呈正相关关系,与  $D$  呈负相关关系, $HOC$  含量与土壤团聚体  $MWD$ 、 $GMD$  及  $>R_{>0.250}$ 、 $D$  均呈正相关关系,但相关性明显弱于土壤  $TOC$ 、 $LOC$  含量。其原因可能有以下两点:一是土壤有机碳特别是轻组活性有机碳可能充当了土壤团聚体稳定性的胶结剂,促进大粒径团聚体形成;二是重组有机碳不易分解,在影响微生物代谢活性方面明显弱于轻组活性有机碳,而大粒径团聚体的形成易受微生物菌丝以及胶结物质的影响,从而表现出明显差异<sup>[8]</sup>。由此表明,土壤  $TOC$ 、 $LOC$  对促进甘薯连作田土壤大粒径团聚体形成以及提升团聚体稳定性具有至关重要的作用。

### 3.3 生物有机肥与钙镁硅型调理剂对甘薯产量的影响

添加外源有机物有利于改善土壤结构,提升土壤团聚体稳定性,进而提高鲜薯产量及品质<sup>[44]</sup>。合理配施土壤调理剂能够提高土壤孔隙度,降低土壤容重,改善土壤结构,提高作物产量<sup>[45]</sup>。本研究表明,与不施肥对照或单施化肥对照相比,配施生物有机肥或土壤调理剂能够提高鲜薯产量,同肖占文等<sup>[46]</sup>人的研究结果一致。这与生物有机肥以及土壤调理剂能够有效改善土壤结构<sup>[47]</sup>、提高土壤团聚体稳定性以及有机碳含量有密切联系,土壤结构及微生态环境的改善能够促进作物对地下养分的吸收利用,从而促进甘薯的生长发育。单施生物有机肥处理的鲜薯产量显著低于化肥+生物有机肥或化



肥+土壤调理剂处理,这可能与生物有机肥养分释放速率较缓有关,影响甘薯植株前中期生长发育。

## 4 结 论

与不施肥对照或单施化肥对照相比,单施生物有机肥处理能够提高团聚体  $MWD$  以及各粒级团聚体  $TOC$ 、 $HOC$  含量;化肥+土壤调理剂处理能够提高  $>2.000\text{ mm}$ 、 $0.251\sim 2.000\text{ mm}$  粒级团聚体占比以及  $GMD$ 、 $R_{>0.250}$  和各粒级团聚体  $LOC$  含量,提升  $>2.000\text{ mm}$ 、 $0.251\sim 2.000\text{ mm}$  团聚体对  $TOC$ 、 $LOC$ 、 $HOC$  的贡献率,显著提高鲜薯产量。冗余分析(RDA)结果表明,土壤  $TOC$ 、 $LOC$  含量与土壤团聚体  $MWD$ 、 $GMD$ 、 $R_{>0.250}$  呈正相关关系,与  $D$  呈负相关关系。其中,  $>0.250\text{ mm}$  粒级团聚体含量(56.15%)为主要驱动因子,表明不同施肥措施条件下土壤  $TOC$ 、 $LOC$  含量对促进甘薯连作田土壤大粒径团聚体形成以及提升团聚体稳定性具有至关重要的作用。由此可知,单施生物有机肥或化肥+土壤调理剂处理能够提升土壤团聚体稳定性,提高土壤有机碳及其组分含量。其中,化肥+土壤调理剂处理表现较好。

## 参考文献:

- [1] 刘亚军,王文静,李 敏,等. 不同除草剂减量与助剂复配对杂草防效、甘薯生长发育和产质量的影响[J]. 河南农业科学, 2023, 52(3): 91-100.
- [2] 陆建珍,汪 翔,秦建军,等. 我国甘薯种植业发展状况调查报告(2017年)——基于国家甘薯产业技术体系产业经济固定观察点数据的分析[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(23): 393-398.
- [3] 柳小兰,邓廷飞,王道平,等. 不同施肥处理对连作土壤-辣椒体系中重金属富集特性及辣椒品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(13): 232-240.
- [4] 郭山虎,武忠明,王永平,等. 施肥措施对烤烟连作障碍的消减作用初探[J]. 中国农学通报, 2023, 39(19): 9-15.
- [5] 徐 赛,杨延杰,圣亚男,等. 有机无机肥配施对日光温室番茄连作土壤微生物的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53(4): 897-906.
- [6] 卢合全,唐 薇,罗 振,等. 商品有机肥替代部分化肥对连作棉田土壤养分、棉花生长发育及产量的影响[J]. 作物学报, 2021, 47(12): 2511-2521.
- [7] 张婉婷,金成功,张 欢,等. 有机无机肥料配施对连作区玉米土壤微生物及养分含量的影响[J]. 作物杂志, 2016(3): 110-115.
- [8] 杨 凯,李延锋,张西兴,等. 化肥与不同有机物料配施对土壤有机碳组分及土壤水稳性团聚体的影响[J/OL]. 土壤通报, 2024, 55(3): 707-715.
- [9] 周郑雄,冯 豪,丁继林,等. 复合微生物肥对植烟根际土壤团聚体稳定性和酶活性的影响[J]. 南方农业学报, 2022, 53(11): 3088-3097.
- [10] WU X, LI H, WANG Y, et al. Effects of bio-organic fertiliser fortified by *Bacillus cereus* QJ-1 on tobacco bacterial wilt control and soil quality improvement[J]. Biocontrol Science and Technology, 2020, 30(4): 351-369.
- [11] 宋以玲,于 建,陈士更,等. 化肥减量配施生物有机肥对油菜生长及土壤微生物和酶活性影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 352-360.
- [12] 张明来. 福建酸性红壤施用钙镁型土壤调理剂的效果研究[J]. 中国土壤与肥料, 2021(2): 283-288.
- [13] 孙蓓峰,王 旭. 土壤调理剂的研究和应用进展[J]. 中国土壤与肥料, 2013(1): 1-7.
- [14] 段文学,张海燕,解备涛,等. 化肥和生物有机肥配施对鲜食型甘薯块根产量、品质及土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(11): 1971-1980.
- [15] 王 磊,王 静,张爱君,等. 小麦-甘薯轮作长期增施有机肥对碱性土壤固氮菌群落结构及多样性的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(16): 5771-5782.
- [16] 贾 璇,赵 冰,吴昊天,等. 餐厨垃圾调理剂对果园土壤团聚体组成及分布的影响[J]. 环境科学研究, 2020, 33(9): 2163-2168.
- [17] 靳辉勇,黎 娟,朱 益,等. 土壤调理剂对烤烟根系活力及根际土壤微生物碳代谢特征的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(1): 158-165.
- [18] 唐光木,张云舒,徐万里,等. 长期耕作对新疆绿洲农田土壤颗粒中有机碳和全氮含量的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(24): 5039-5050.
- [19] 郭阳阳. 锌与有机物料配施对土壤团聚化及有机碳分布的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2022.
- [20] 冯秋苹,刘玉涛,郭勇智,等. 不同秸秆还田方式对土壤团聚体稳定性及有机碳含量的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2023, 45(5): 564-571.
- [21] 张平良,郭天文,刘晓伟,等. 长期施肥与覆膜对半干旱区马铃薯农田土壤团聚体分布及其有机碳含量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(7): 104-111.
- [22] 何翠翠,王立刚,王迎春,等. 长期施肥下黑土活性有机质和碳库管理指数研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(1): 194-202.
- [23] 李 敏,刘亚军,王文静,等. 施肥方式对连作甘薯田土壤团聚体稳定性及酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(13): 252-260.
- [24] 刘茂兰,吉春阳,江森华,等. 强还原土壤处理联合生物炭对连作障碍土壤团聚体碳、氮分布的影响[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2023, 39(4): 81-88.
- [25] 杨卫君,惠 超,陈雨欣,等. 连作年限对棉田土壤团聚体有机碳分布的影响[J]. 中国农学通报, 2022, 38(13): 104-108.
- [26] 金 珊,刘 雪,陈卓帛,等. 有机肥配施生物菌肥对设施黄瓜土壤改良效果[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(9): 1995-

- 2003.
- [27] 沈彦辉,胡璋健,赵冬梅,等. 矿物型土壤调理剂用量对设施黄瓜生长、品质及土壤性状的影响[J]. 中国瓜菜,2023,36(8):33-41.
- [28] 朱 慧,何颖悦. 不同土壤调理剂配施对连作番茄土壤特性和产量与果实品质的影响[J]. 中国瓜菜,2023,36(5):104-108.
- [29] 孙 雪,张玉铭,张丽娟,等. 长期添加外源有机物料对华北农田土壤团聚体有机碳组分的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文),2021,29(8):1384-1396.
- [30] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2000:23-126.
- [31] 高继伟,谢英荷,李廷亮,等. 不同培肥措施对矿区复垦土壤活性有机碳的影响[J]. 灌溉排水学报,2018,37(5):6-12.
- [32] ANANYEVA K, WANG W, SMUCKER A J M, et al. Can intra-aggregate pore structures affect the aggregate's effectiveness in protecting carbon[J]. Soil Biology & Biochemistry,2013,57(23):868-875.
- [33] 任立军,李 金,邹洪涛,等. 生物有机肥配施化肥对设施土壤养分含量及团聚体分布的影响[J]. 土壤,2023,55(4):756-763.
- [34] 廖超林,黎丽娜,谢丽华,等. 增减施有机肥对红壤性水稻土团聚体稳定性及胶结物的影响[J]. 土壤学报,2021,58(4):978-988.
- [35] 鲁泽让,李永梅,杨春怀,等. 连续周年轮作休耕对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响[J]. 环境科学,2024,45(3):1644-1654.
- [36] 吕奕彤,于爱忠,吕汉强,等. 绿洲灌区玉米农田土壤团聚体组成及其稳定性对绿肥还田方式的响应[J]. 中国生态农业学报(中英文),2021,29(7):1194-1204.
- [37] 石艳香,迟凤琴,张久明,等. 不同施肥处理黑土中添加秸秆对土壤团聚体稳定性及有机碳贡献率的影响[J]. 土壤通报,2023,54(4):856-863.
- [38] 王 飞,李清华,何春梅,等. 长期施肥对黄泥田土壤团聚体中氮素积累和有机氮组成的影响[J]. 中国农业科学,2023,56(9):1718-1728.
- [39] 李停锋,李 雯,郭君钰,等. 土壤调理剂配施菌剂对连作压砂田土壤养分及西瓜生长、产量的影响[J]. 核农学报,2021,35(8):1923-1930.
- [40] 王 强,耿增超,许晨阳,等. 施用生物炭对壤土土壤微生物代谢养分限制和碳利用效率的影响[J]. 环境科学,2020,41(5):2425-2433.
- [41] 曹晶晶. 棉秆还田对连作棉田土壤团聚体养分及有机碳组分的影响[D]. 石河子:石河子大学,2016.
- [42] 廖 敏,彭 英,陈 义,等. 长期不同施肥管理对稻田土壤有机碳库特征的影响[J]. 水土保持学报,2011,25(6):129-133,138.
- [43] GHOSH B N, MEENA V S, SINGH R J, et al. Effects of fertilization on soil aggregation, carbon distribution and carbon management index of maize-wheat rotation in the north-western Indian Himalayas[J]. Ecological Indicators,2019,105:415-424.
- [44] 秦广利,陈玉琴,崔保伟. 长期添加外源不同有机物对土壤性状和甘薯产量的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(17):98-104.
- [45] 张建鹏. 土壤调理剂配施有机肥对连作马铃薯土壤的改良效果[J]. 江苏农业科学,2023,51(11):219-226.
- [46] 肖占文,赵致禧,赵芸晨,等. 化肥减量下有机肥配施土壤调理剂和生物菌肥对玉米连作土壤的生态修复效应[J]. 中国土壤与肥料,2023(10):48-54.
- [47] 张建鹏. 化肥减量配施微生物菌肥及土壤调理剂对重茬马铃薯生长发育和土壤质量的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(7):205-212.

(责任编辑:蒋永忠)